

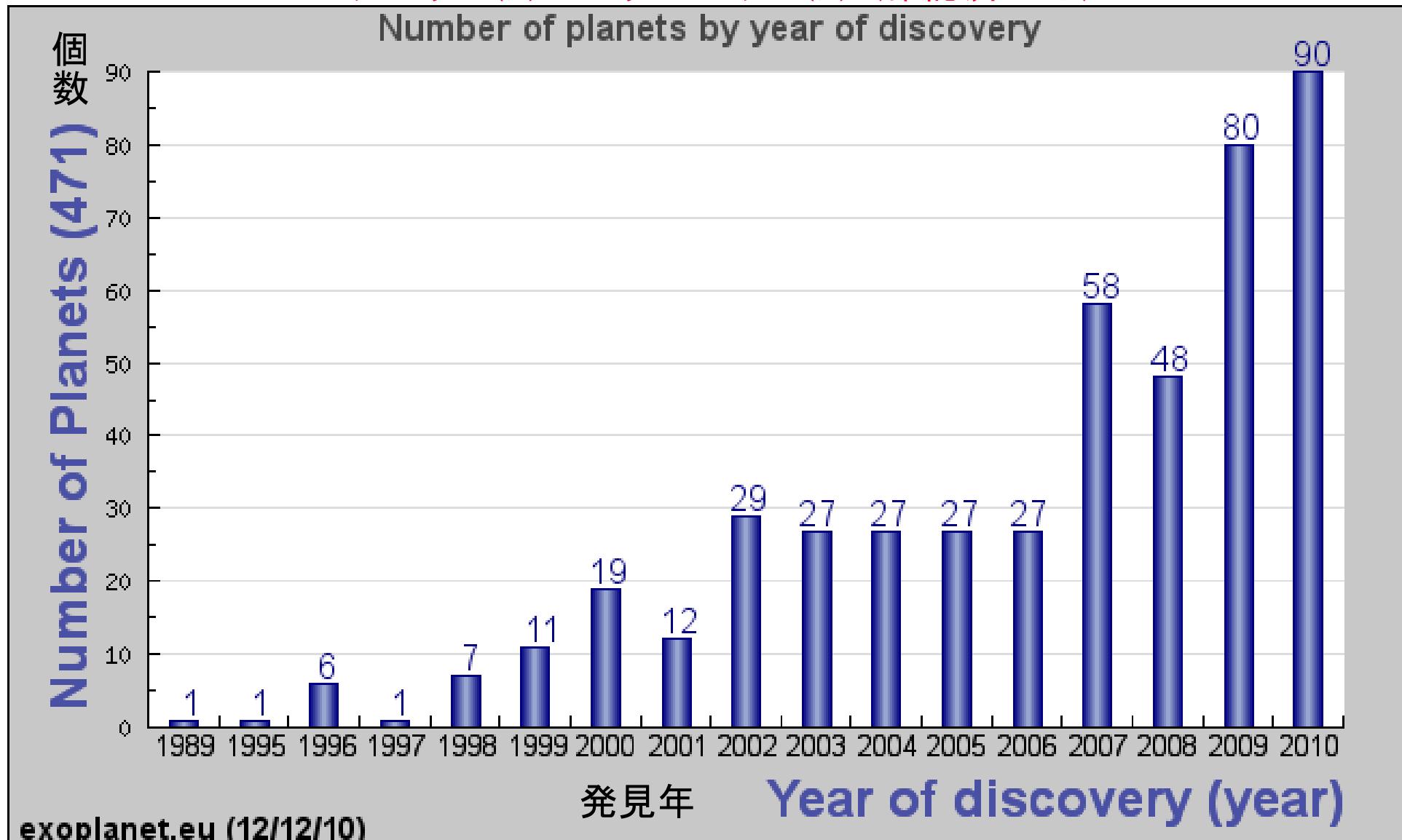
2010.12.17 金曜日 9:30-9:50
SPICA WS

2018年の系外惑星学： SPICAが狙うもの

国立天文台
太陽系外惑星プロジェクト室
田村元秀

系外惑星候補の数 VS. 年

ドップラー法＋トランジット法（確認済のみ）



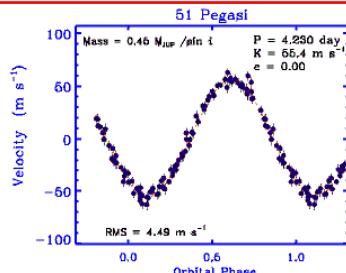
系外惑星検出方法

間接観測法

惑星からの光を直接見ているわけではない

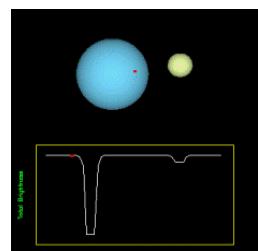
ドップラー法

惑星の公転運動による
恒星の速度ふらつきを
分光観測により検出



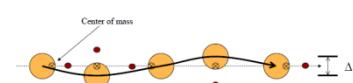
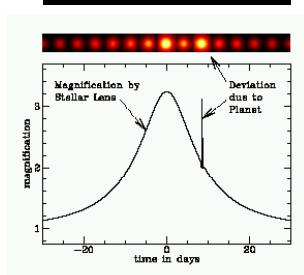
トランジット法

惑星が恒星の前面を
通過する際の明るさの
変化を検出



マイクロレンズ法

惑星を伴う恒星が背景の
恒星の近くを通過する際
の重力レンズ効果による
明るさの変化を検出



アストロメトリ法

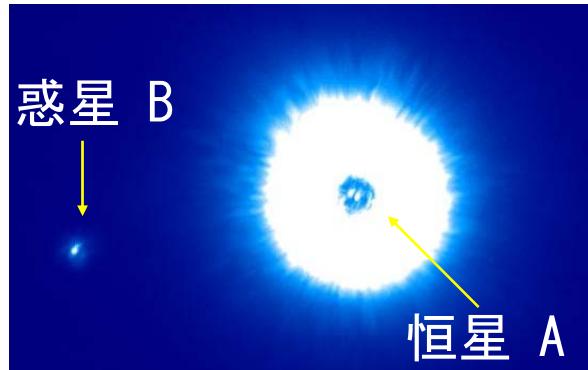
惑星の公転運動による
恒星の位置ふらつきを検出

系外惑星数は500個を超えた (+706個のトランジット候補在)

直接観測法

惑星と恒星を見分けて撮像する

直接撮像法

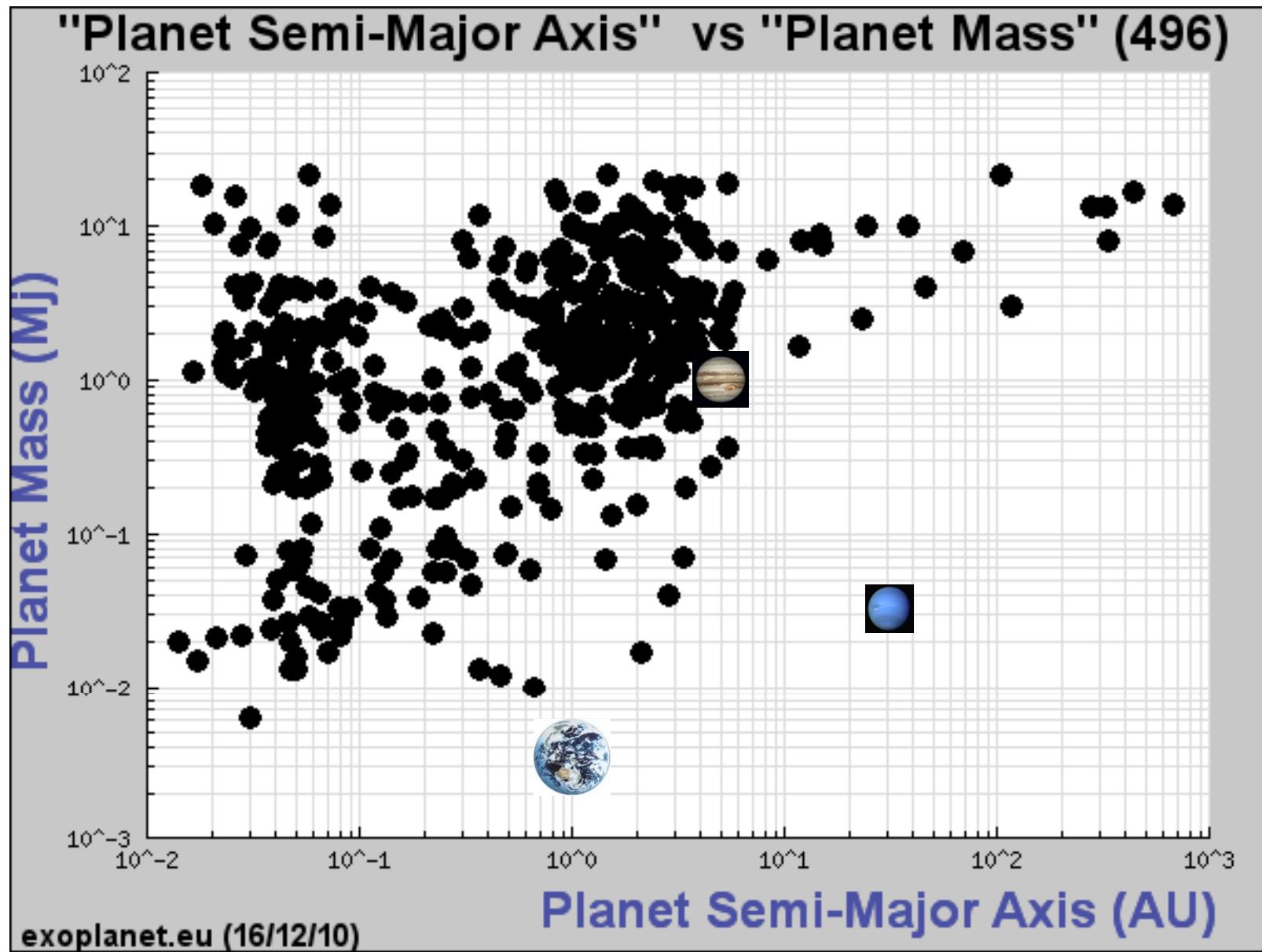


- 高解像度観測により、
恒星と惑星を見分けて撮像する。
- 惑星からの放射を検出・撮像。
- 恒星も惑星も点状天体として写る。
- 究極の惑星観測法。

系外惑星観測の歴史

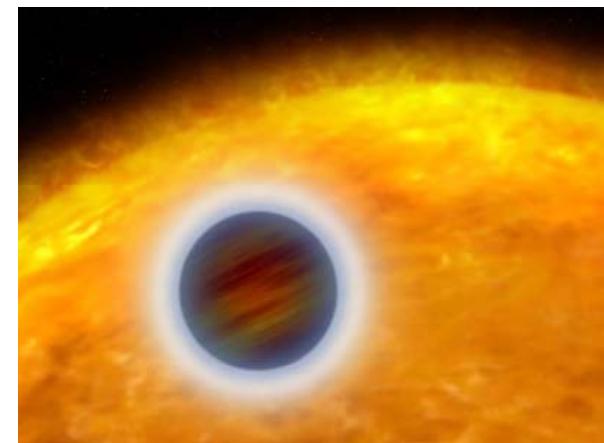
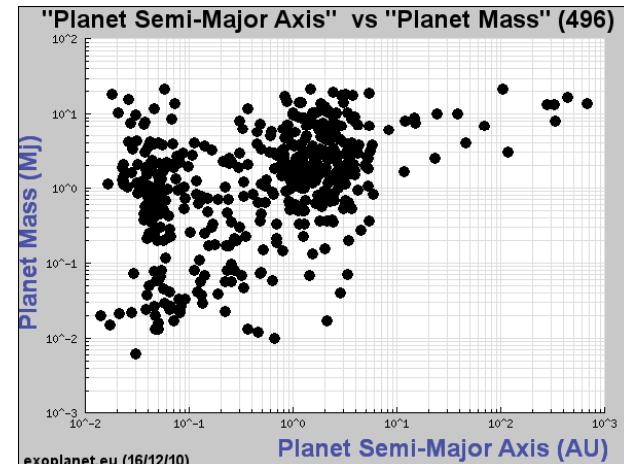
- 1969: Barnard星: 周期25年、1.7木星質量惑星 (van de Kamp in AJ)
- 1979: 高精度ドップラー技術の出現とRV探査 (Campbell, Walker)
- 1989: 恒星を周回する惑星か褐色矮星? - HD 114762 (Latham+)
- 1992: ハルツーを周回する2つの「惑星」 - PSR B1257+12 (Wolszczan & Frail)
- 1995: **恒星を周回する惑星の最初の発見** - 51 Peg b (Mayor & Queloz)
- 1999: 最初の3(多)重惑星系 - ups And
- 2000: **トランジット法の成功** - HD 209458 b (Charbonneau+)
スペース系外惑星ミッションの検討が本格化
- 2002: HD 209458b の大気 (NaD線) (Charbonneau+)
: アストロメトリの応用 - Gliese 876 (Benedict+)
- 2004: **重力レンズ法の成功** (Bond+)
- 2005: 直接撮像の第一報告群 - GQ Lup b, DH Tau b, 2M1207 (VLT, すばる)
: 惑星からの熱放射 (Spitzer; Demming+; Charbonneau+)
- 2008: **直接撮像: 木星の10倍程度、A型星** - HR8799 (3惑星+1惑星) & Fomalhaut (Gemini, Keck); beta Pic (VLT, 2010年確認)
- 2009: Gliese 581e, 最小質量惑星 (1.9地球質量)
太陽型(G型)恒星の惑星候補直接撮像 (GJ758; すばるHiCIAO)
- 2010: **岩石惑星** Corot-7Bの発見 (Leger+)
Kepler衛星データ部分リリース (**地球型惑星** 140個程度を予報)
ハビタブル地球型惑星? (Gliese 581g, Vogt+)

系外惑星観測まとめ：2010年まで



系外惑星観測まとめ：2010年まで

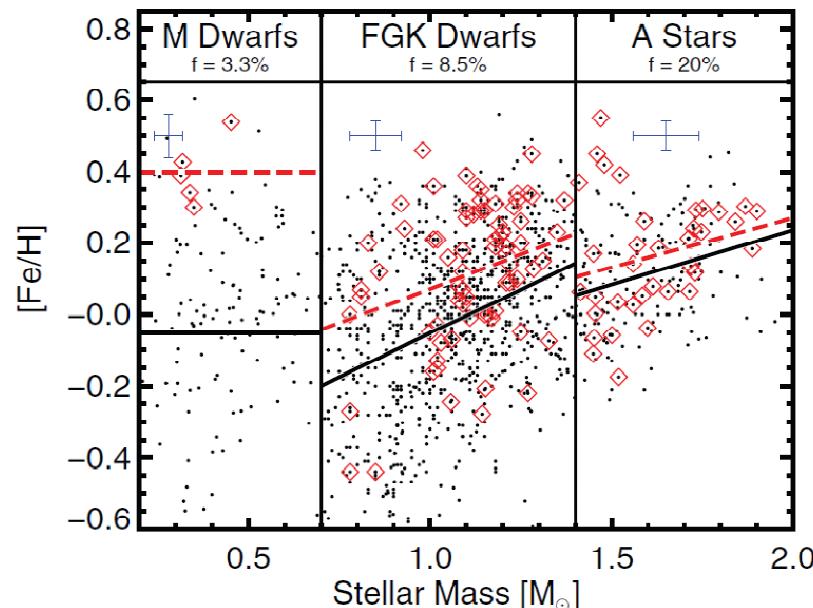
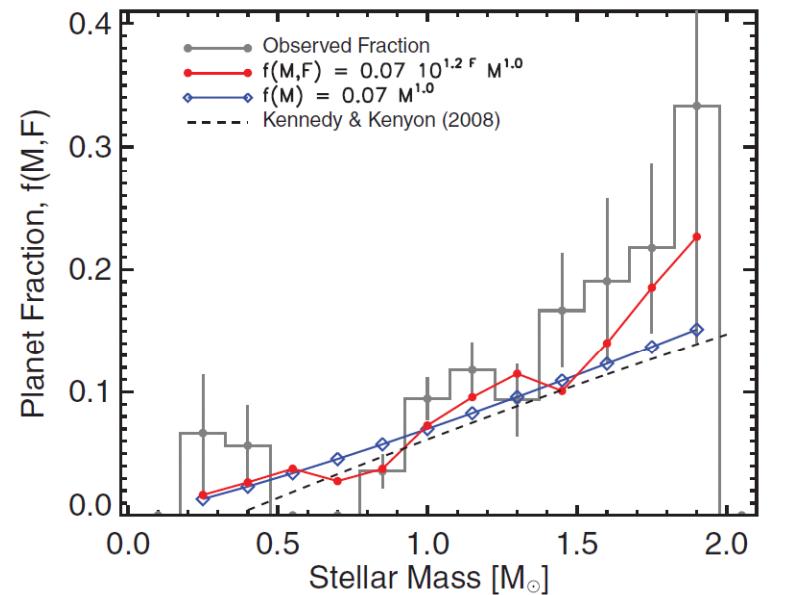
- ドップラー法による巨大惑星の統計の確立（サンプル数千個）
 - 約10%の太陽型恒星に巨大惑星が存在する ($m\sin i$ と軌道が判明)
 - 約25%の系外惑星が複数存在
- トランジット法との併用あるいは応用により、惑星のキャラクタリゼーションにも突入
 - 約100個の惑星は半径も判明
 - 惑星大気も観測
- 画像も取得（直接撮像・分光）
- 地球型惑星に肉薄
 - トランジット、ドップラー、マイクロレンズとも



系外惑星の性質: 頻度

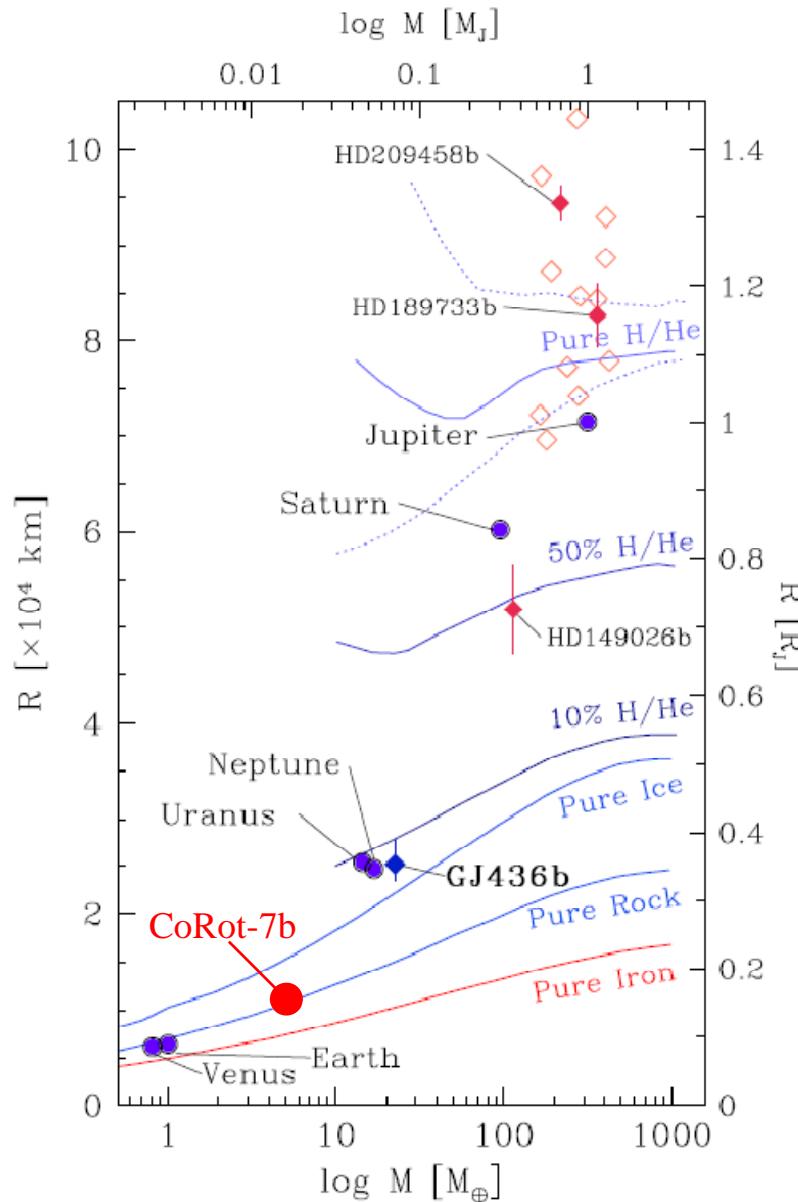
- Keckサーベイ

- 等質性が重要
- $K > 20 \text{ m/s}$ & $a < 2.5 \text{ AU}$
- 1266 stars
- $0.2 - 1.9 M_{\oplus}$
- $2.5 \pm 0.9\%$ for $0.4 \pm 0.3 M_{\oplus}$
- $6.5 \pm 0.7\%$ for $1.0 \pm 0.3 M_{\oplus}$
- $11 \pm 2\%$ for $1.6 \pm 0.3 M_{\oplus}$
- $N_{\text{planets}}/N_{\text{stars}} = 0.07 * (M/M_{\oplus})^{1.0}$
 - fit for $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$
- Johnson et al. 2010



系外惑星の性質：密度

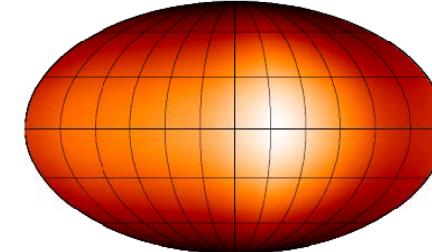
- 理論と比較的良い一致
 - ★ Hot Jupiterのいくつかに半径超過が見られる
 - ★ HD209458, WASP1, HAT1,
 - ★ 大気散逸+ α ？
 - ★ 反対に、高密度の惑星
 - ★ HD1409026
 - ★ 高密度コアの存在
 - ★ より軽いトランジット惑星CoRot-7bやGJ436bの発見により、さまざまな系外惑星の密度がわかつってきた
 - ★ 氷惑星や、ほぼ地球型まで
 - ★ Leger+09



惑星の表面と大気

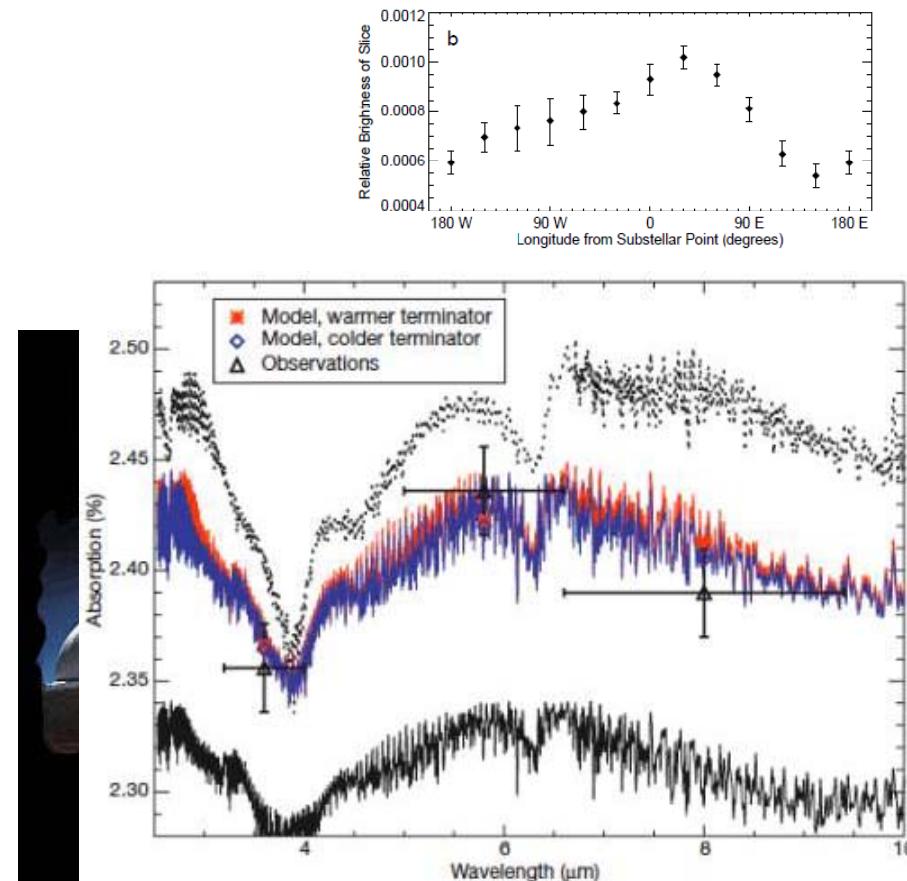
- HD189733を軌道運動に応じて赤外線観測

- 周期2.2日のホット・ジュピター
- 世界初の系外惑星の（温度）地図
- 潮汐力で固定
- 昼夜の温度差は小さかった
- 大規模な大気循環
- υ Andの結果とは矛盾



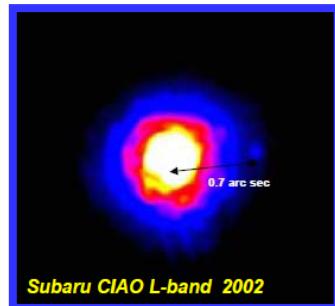
- 惑星大気中の分子を検出！

- 水
- メタン
- 二酸化炭素
- 惑星の特徴付けの時代へ
- Swain+09, Tinetti+07
- HD209458b, HD189733b

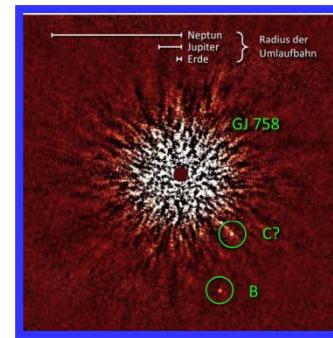
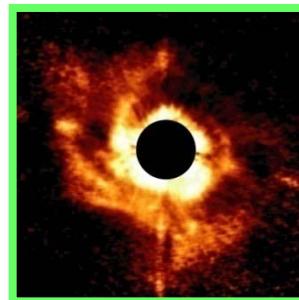


SEEDS -Strategic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru

- 最初の“Subaru Strategic Program (SSP)” – 新しい共同利用枠
- 新コロナグラフHiCIAOと新補償光学AO188を活用
- 5年間ですばる120夜 ⇒ AOトラブル ⇒ **2010年11月30日から再開！**
- 太陽型星およびより重い星約500個の直接観測(これまでのドップラー法やトランジット法では**未開拓の領域**; a few – 40 AU)
- 同じ半径領域の原始惑星系円盤と残骸円盤の高解像度直接観測
- これらを結び付けて、**円盤から惑星系への進化**を解明する



>100AU scale
w/ CIAO



Solar-System
Scale (<50AU)
w/ HiCIAO

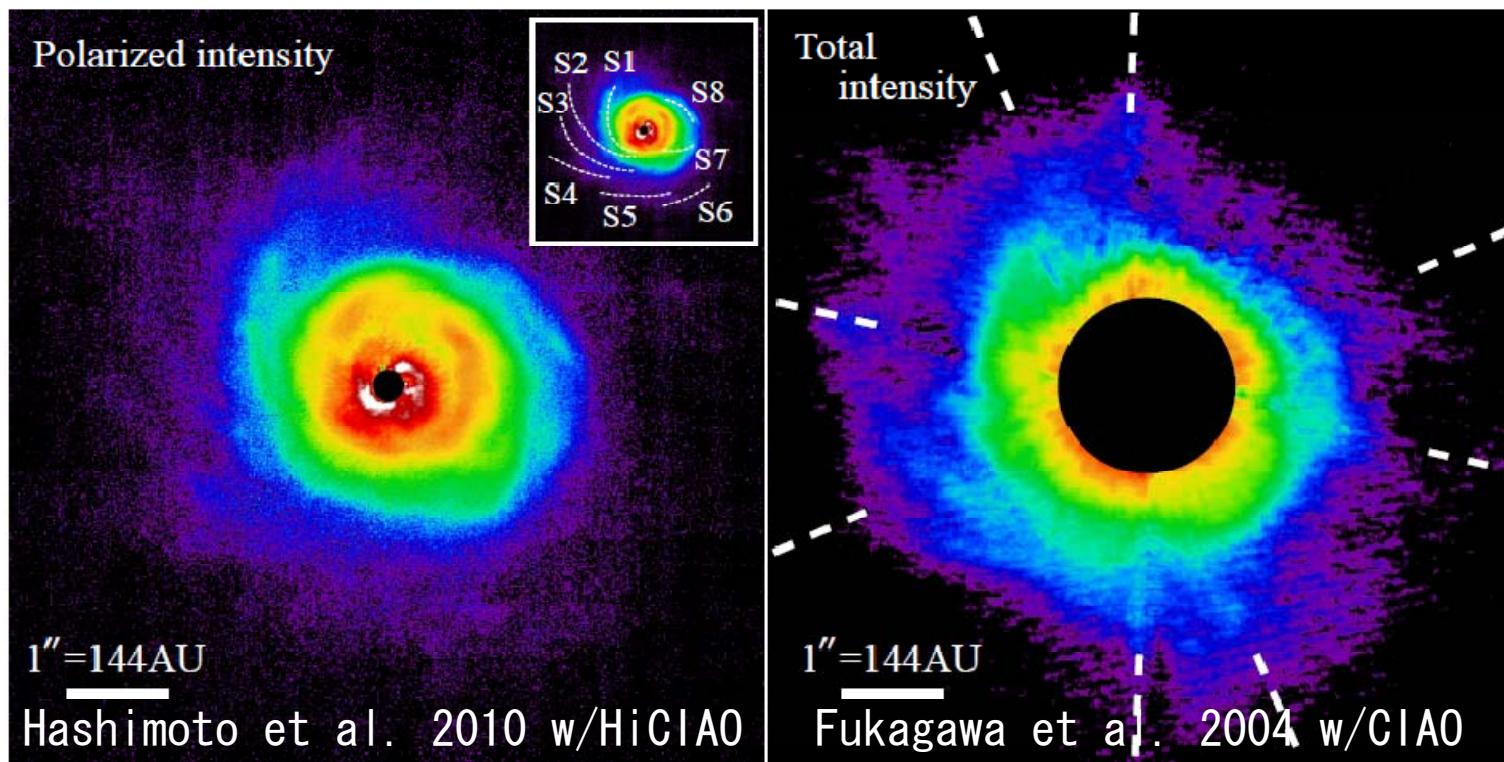


disk data shown later

原始惑星系円盤のこれまでにない詳細構造

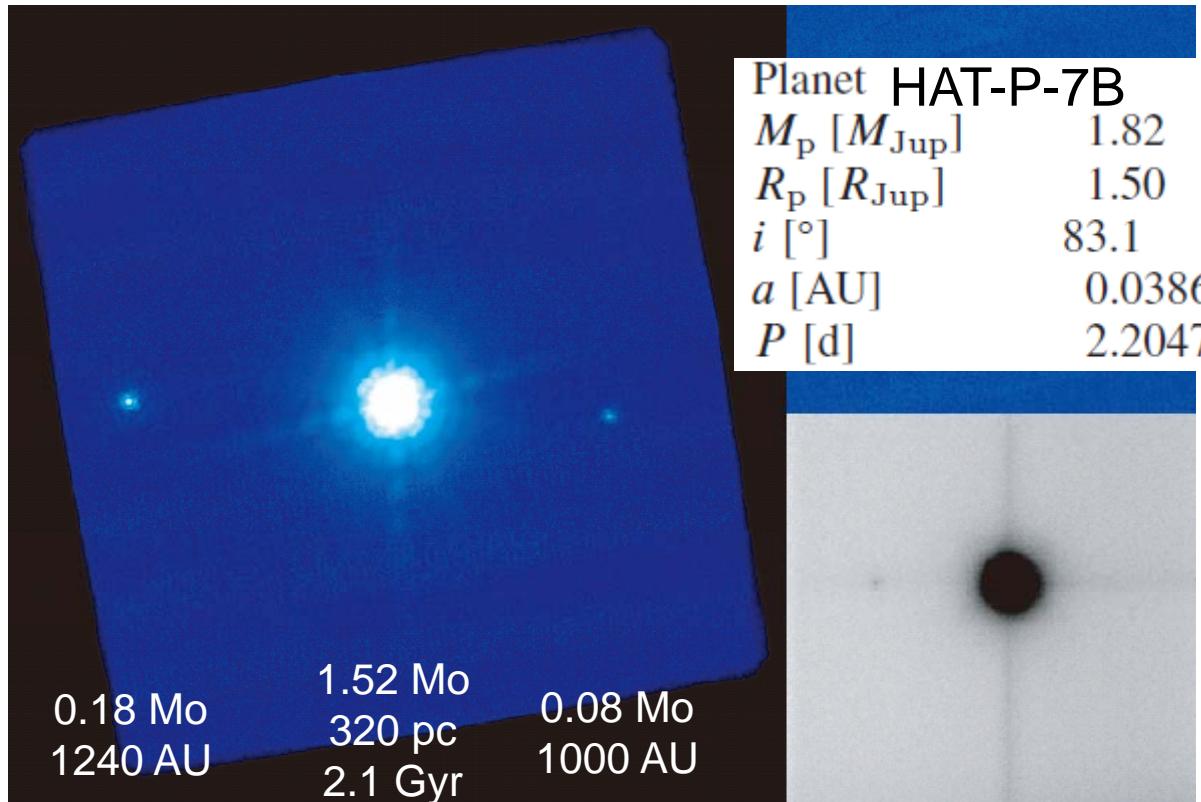
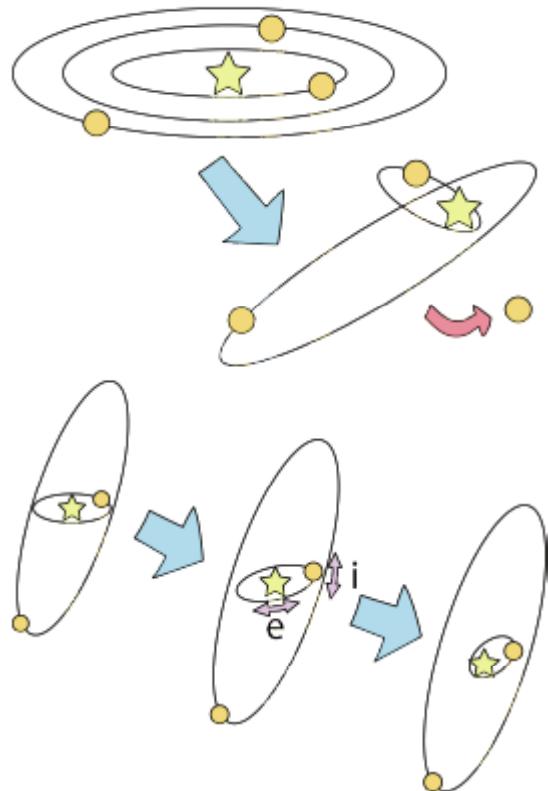
- AB Aur: Herbig Ae star, 年齢 4Myr, 恒星質量 2.4Mo, 距離 144pc
- 初めて $r < 40$ AU を 8 AU 解像度で撮像 (1.6um)
- 2重リング構造*リング状ギャップ
- 円盤の「ワープ」や「中心星からの位置ずれ」
- Hashimoto, Tamura, Muto et al. 2010 submitted

円盤詳細構造
↓
惑星存在の証拠



トランジット惑星における直接撮像観測で伴星候補を発見：HAT-P-7 (320pc)

(Narita et al. 2010)

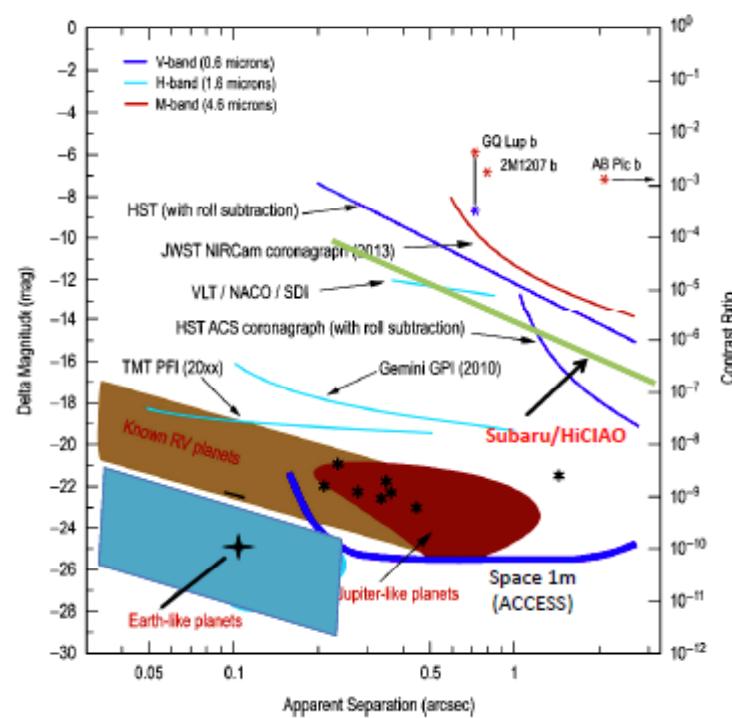
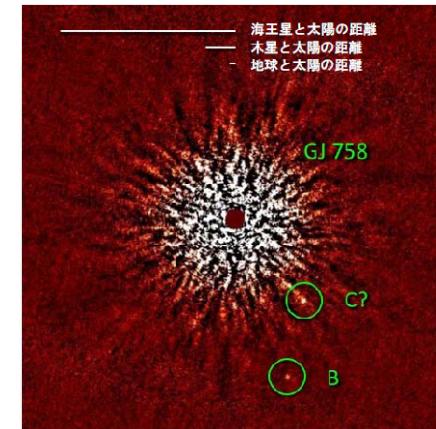


Left: 1.6 um image of HAT-P-7 (12''x12''). Upper right: A ADI/LOCI reduced Subaru image (6''x6''). Lower right: AstraLux z' band image of HAT-P-7 and the eastern companion candidate.

直接撮像による、惑星散乱・移動理論の検証という新アプローチ

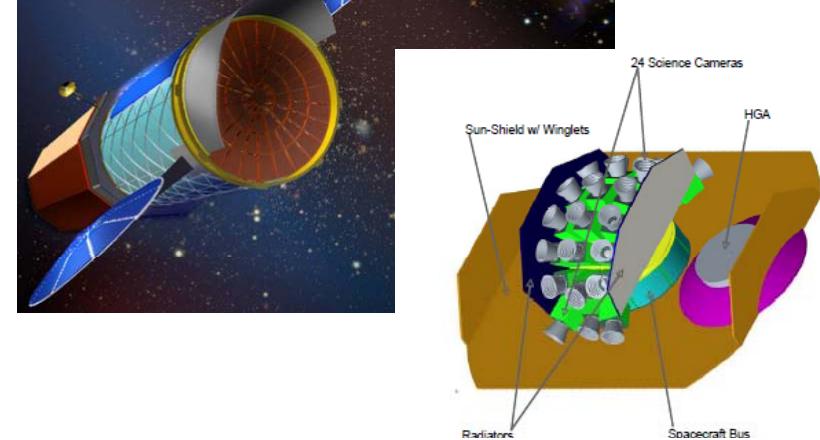
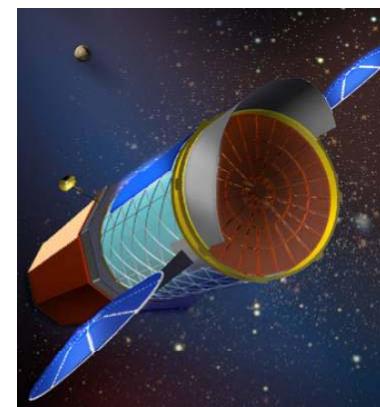
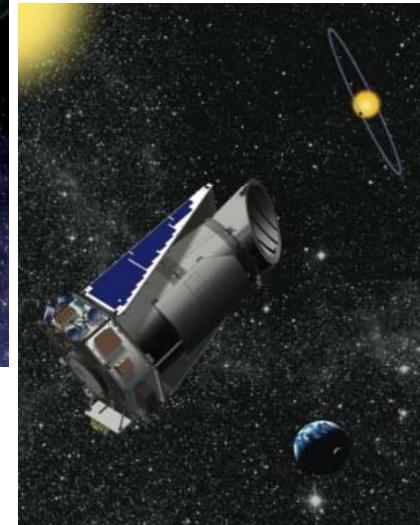
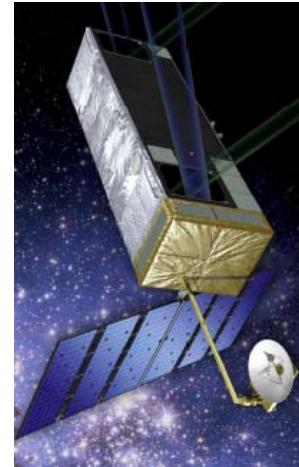
地上の今後10年

- 8m地上による直接観測サーベイ
 - HiCIAO/SEEDS、SCExAO、GPI、SPHEREが2013年までに揃い踏み、と予想
- 遠方巨大惑星の統計
 - 主に若い惑星(<1Gyr)
 - 恒星の総サンプルは1000個以上
 - 各装置ともサーベイを計画
- 遠方巨大惑星の大気分光
 - IFUの利用
- 地球型惑星
 - 8m望遠鏡+赤外ドップラー法
 - 2014年以降から本格観測
 - M型星のハビタブル惑星のサーベイ
 - TMTによる直接観測
 - IRDで検出した惑星がそのままターゲットに



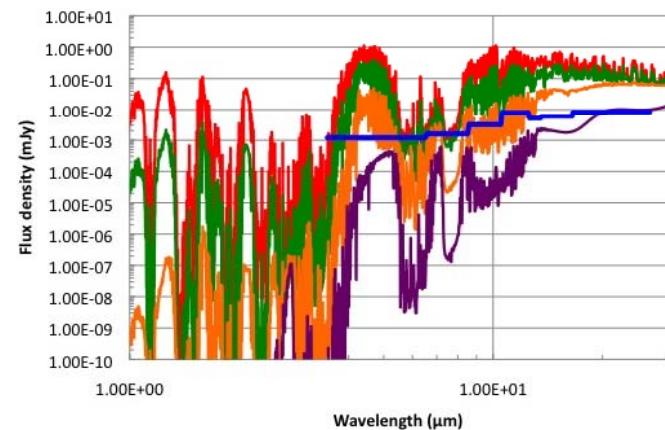
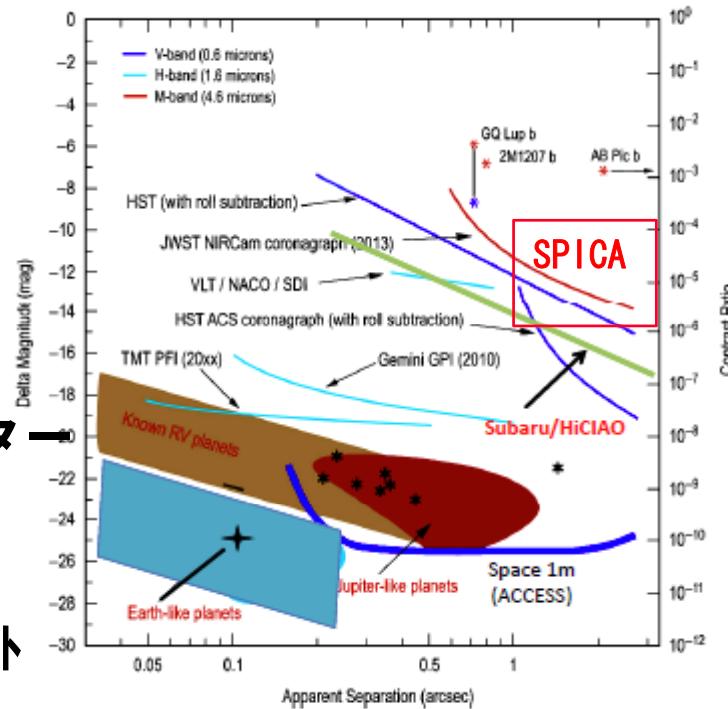
NASAの選択: decadal report

- ・ 2010-2020の最も重要な科学の一つと位置付けたが、専用ミッションは推薦なし
 - SIM (アストロメトリ) はキャンセルされた
- ・ Kepler (トランジット) の仕上げ
 - 地球型惑星の統計
 - 詳細なフォローアップには向かない
- ・ WFIRSTの推薦
 - DEの他にマイクロレンズも
 - 地球より軽い惑星を含む統計
 - 詳細なフォローアップには向かない
- ・ EXPLOREクラスミッションの推薦
 - ASTrO, EXCEEDS, TESS, Tracer
- ・ 基礎系外惑星科学への投資

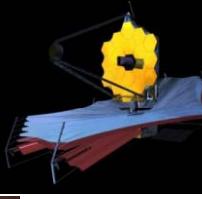
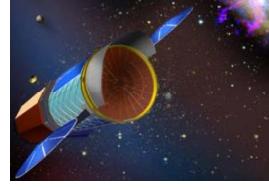
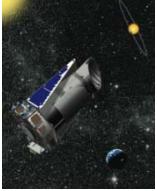
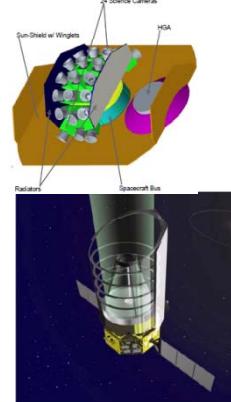
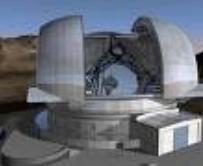
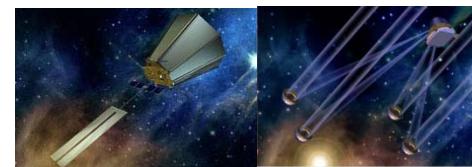


SPICAの狙い

- ・ **巨大惑星の大気**
 - 4ケタのコントラストでも可能
 - ・ JWSTとほぼ同等のコントラスト
 - JWSTより広い波長範囲かつ同時が売り
 - ・ 短波長性能は？（主鏡の実性能次第）
 - 地上より長波長側を活かす
 - 近傍の比較的年老いた惑星系が主たるターゲット
- ・ **氷惑星（松尾talk?）**
 - 最近傍星ならば低温で遠方を狙えるメリット
 - 6ケタのコントラストが狙えるか？
 - JWSTより高コントラストの技術実現努力
- ・ **地球型惑星**
 - SPICAでは難しい対象
 - ・ 直接観測はできない
 - ・ トランジット観測も困難
 - ・ TTVなど特殊なケース
 - ・ 割り切りが必要か？



主に大設備による系外惑星研究の展望

目標	現在	2014	2018	2025~
HST JWST WFIRST	巨大惑星の撮像・分光から各種惑星の統計へ			
8m級 地上鏡 (Subaru/HiCIAO, Gemini/GPI, RD, etc..)	間接法の展開 若巨大惑星の撮像・分光 地球型惑星の検出			スペース等のフォローアップ
Kepler EXPLORE	地球型惑星の統計			
SPICA	老巨大惑星の撮像・分光			
30m級 地上鏡	巨大惑星の分光 地球型惑星の撮像・分光 ⇄ SEITの実現がカギ			
TPF	第2の地球と生命の証拠 ⇄ 可視光コロナグラフから赤外干渉計へ			

科学的 requirement と要望点

- ・ ユーザとしては、もちろん系外惑星専用装置は魅力的であることは言うまでもない
 - 日本はJWSTは基本使えないことも大きい
- ・ ただし、SPICA打ち上げはJWSTの約5年後で、JWSTに対する優位性が現在の基本スペックでは限定的
 - Advanced/Baseline designとは何か実はよくわからない？
Baseline入へックでの科学的意義は限定的と思われるため、単独装置とするならば、「JWSTの性能を超えることが必須」だろう
 - 今の入へック変更は急であった。目指すサイエンスが、10年後のサイエンスとして魅力的かどうかの再検討は要らないか？
 - Fact sheetでは感度とコントラストが分離していて、分光における検出感度の波長依存性などがわからない
 - MIR装置にコロナグラフマスクを置くことによるサイエンスとの比較
 - ・ 科学的目的と装置コストのバランス感覚も必要だろう